

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241622

配电网谐波源信息未知条件下的监测装置优化配置方法

汪颖¹, 李元聪¹, 刘育权², 肖先勇¹, 张华赢³, 陈韵竹¹

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 南方电网数字电网研究院股份有限公司, 广东 广州 510000;
3. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 配电网非线性设备的广泛接入, 导致多谐波源在网内共存, 进行谐波治理的前提是通过安装监测装置以明确谐波信息。但是, 在监测装置配置决策时, 通常会面临配电网谐波源信息未知的场景。提出一种监测装置优化配置方法, 兼顾谐波溯源精确性与配置经济性, 实现在上述场景下的监测装置最优配置。首先, 提出一种多场景谐波电流样本生成方法, 构建计算量较低的节点谐波电流关联模型, 实现快速、大量地生成谐波电流样本, 解决谐波源信息未知状态下的样本缺失问题。其次, 提出节点谐波源敏感度计算方法, 解决多谐波源相互作用下节点关联性的刻画问题。再次, 提出基于敏感度的监测装置配置方法, 构建敏感度集中性与分散性约束条件, 解决冗余配置问题。最后, 基于 IEEE33 节点系统进行算例分析, 结果显示该方法配置的监测装置数量仅占节点总数的 21.8%, 验证了其正确性和适用性。

关键词: 优化配置; 支持向量回归; 敏感度计算; 数据生成; 谐波溯源

Optimal placement method for monitoring devices under unknown harmonic source information in distribution networks

WANG Ying¹, LI Yuancong¹, LIU Yuquan², XIAO Xianyong¹, ZHANG Huaying³, CHEN Yunzhu¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute, Guangzhou 510000, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: The widespread integration of nonlinear equipment in distribution networks leads to the coexistence of multiple harmonic sources with the network. A prerequisite for harmonic mitigation is to obtain the harmonic information through the installation of power quality monitoring devices. However, when making decisions on the placement of monitoring devices, it is common to encounter scenarios where harmonic source information is unknown. This paper proposes an optimal placement method for monitoring devices that balances the accuracy of harmonic source identification and the cost-effectiveness of monitoring devices placement, thereby achieving optimal deployment under such conditions. First, a multi-scenario harmonic current sample generation method is proposed, which builds a low-complexity node harmonic current correlation model to enable rapid and large-scale generation of harmonic current samples, thereby addressing the problem of missing samples when harmonic source information is unavailable. Second, a node harmonic source sensitivity calculation method is presented to characterize node correlations under the interaction of multiple harmonic sources. Then, an optimal placement method for monitoring devices based on the proposed sensitivity index is introduced, incorporating centralized and decentralized sensitivity constraints to avoid redundant placements. Finally, case studies based on the IEEE33-bus system show that the number of monitoring devices configured by this method accounts for only 21.8% of the total nodes, verifying its correctness and applicability.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2407600).

Key words: optimal placement; support vector regression; sensitivity calculation; data generation; harmonic source identification

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFB2407600)

0 引言

新型电力系统建设背景下,大量风、光、储、充等非线性设备接入配电网,谐波源数量陡增^[1-2],进行谐波监测是其有效治理的前提。配电网点多面广,难以通过大量配置电能质量监测装置(以下简称监测装置)的手段^[3]实现全网谐波状态可观。进行监测装置优化配置,是低成本实现谐波全景感知的有效途径,可为谐波溯源、治理等提供丰富信息^[4],具有重要的工程意义。

配电网点多面广,监测装置配置数量有限,难以大量、充分地记录各节点谐波样本。电网公司在进行配电网监测装置优化配置时,主要面临的是系统内谐波源信息未知的场景,可用数据一般仅包括系统网架结构、基础阻抗参数等。因此,针对包含未知谐波源的配电网进行低成本的监测装置优化配置,需解决3方面的问题:提升样本丰富性、明确节点相关性、降低配置冗余性。

1) 提升样本丰富性。提升样本丰富性的主要手段是在已有基础网架结构中,设置可能的谐波源,进行大量仿真,从而实现样本增广。现有文献提出谐波源随机设置法和遍历法,拟解决上述问题。文献[5-7]随机设定谐波源位置及发射水平,提取谐波电压、电流样本进行分析。但配电网节点数量多,此类方法可能出现谐波源节点未被设置的情况,因此,学者们尝试用遍历法进行样本生成。文献[8-9]设置不同数量及发射水平的谐波源,遍历存在的各种组合,生成大量仿真样本。上述方法在节点数较少的主网能起到信息补充的明显效果,但在点多面广、源网荷储充运行特性多变的配电网中^[10],谐波潮流计算复杂程度高、速度慢,难以大量实施。

2) 明确节点相关性。在较高相关性的多节点区域可较少地设置监测装置,在状态评估阶段以“算法评估”替代“广泛监测”,实现全局可观。而高精度的状态估计,极大程度上依赖节点间相关性。现有研究主要分为基于基波潮流计算和谐波潮流计算的相关性刻画方法。对于前者,文献[11-12]分别提出与功率相关的电气距离指标、与电压相关的模块度指标,刻画节点间的相关性。对于后者,文献[13-15]基于谐波相关参数分别提出互信息指标、动态相关系数以及敏感因子刻画节点间的相关性。但现有指标主要针对单谐波源场景开展研究,应用于谐波源数量多且交互影响^[16]的配电网时,难以刻画多谐波源间的相关性。

3) 降低配置冗余性。为实现谐波状态全局可观,配电网监测装置数量一般为节点总数的30%~

50%^[17]。装置数量直接影响投资、运维成本,尽量减少其数量,是最小化成本的直接手段。现有文献提出的配置方法主要分为两大类,包括邻接监测法与广域监测法。邻接监测法基于基尔霍夫定律与阻抗关系,认为监测点的可观范围仅包括其本身及邻接节点,导致监测装置数量较多^[18-19]。为此,学者们提出广域监测法,通过挖掘节点相关关系,在实现降低监测装置数量的同时,提高谐波状态可观性。现有方法提出谐波敏感因子^[15]、节点关键度指标^[20]、监测能力可观性指标^[21]等,描述监测点的可观范围,确定最优监测点位置,实现广域监测。此类方法主要依赖指标值进行监测点配置,指标值较优的节点过于集中时,易出现局部多节点冗余配置的情况。

综上,本文提出了一种配电网谐波源信息未知条件下的监测装置优化配置方法。首先,针对谐波样本丰富性不足的问题,提出一种多场景谐波电流样本生成方法,通过计算量较大的谐波潮流计算,生成小基数的第1阶段谐波电流基础样本,并构建计算量较低的节点谐波电流关联模型,应用该模型快速生成大基数的第2阶段扩展样本,代表可能存在的谐波场景,从而提升谐波样本丰富性。其次,为明确多谐波源背景下节点间的相关性,生成第3阶段混合样本,结合扩展样本提出敏感度计算方法,量化多谐波源相互作用下各谐波源节点对监测节点的影响。再次,对于监测装置配置冗余高的问题,提出基于敏感度的监测装置配置方法,通过设定敏感度集中性与分散性约束,确保监测装置配置的覆盖性与分散性,解决指标值较优的节点过于集中时导致的冗余配置问题。最后,通过IEEE33节点模型对本文方法进行算例分析,验证了本文所提配置方法的适用性。

1 主要思路

本文主要思路如图1所示,分为3个步骤。

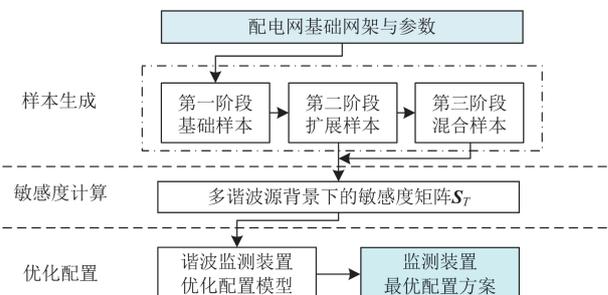


图1 谐波源信息未知条件下的监测装置优化配置流程图
Fig. 1 Flowchart for optimized placement method of monitoring devices for the scenario that the harmonic sources information is unknown

步骤 1: 样本生成。首先, 基于配电网基础网架与参数, 通过谐波潮流计算, 获取少量的谐波电流基础样本; 然后, 构建计算量较低的节点谐波电流关联模型; 最后, 基于该关联模型快速生成大量谐波电流扩展样本及混合样本。

步骤 2: 敏感度计算。将步骤 1 的扩展样本及混合样本作为敏感度计算的输入, 计算多谐波源背景下的节点敏感度矩阵 S_T , 量化节点间的相关性。

步骤 3: 优化配置。首先, 构建谐波监测装置优化配置模型, 设定优化配置的目标函数; 然后, 基于步骤 2 得到的节点敏感度矩阵 S_T , 结合谐波溯源误差及监测装置数量, 设置约束条件; 最后, 求解得到监测装置最优配置方案。

研究内容均是针对某次谐波进行分析, 为了便于表达, 使得字母代码更加简洁, 以下描述均不带某次谐波的表达。

2 多场景谐波电流样本生成方法

2.1 第 1 阶段样本生成: 基础样本

2.1.1 网架阻抗参数设置

电网公司在进行监测点优化配置工作时, 可提供最基本的系统网架结构和阻抗参数, 但是由于运行方式变化、线路改造等相关信息未及时更新等原因, 实际网络阻抗参数和提供的阻抗参数会存在一定误差。

因此, 本文在进行样本生成时, 对基础网架的阻抗参数进行误差设置, 以充分体现实际运行中存在的误差情况。将阻抗参数 Z 的取值范围设置为 $[(1-\gamma)Z_n, (1+\gamma)Z_n]$ 。其中: γ 为阻抗误差系数, 一般可设置为 5%~10%, 以体现误差程度; Z_n 为电网公司提供的基础阻抗参数; 进行仿真生成样本时, 在 Z 的取值范围内随机选取一个数值作为阻抗参数进行仿真。

2.1.2 谐波电流基础样本生成

仿真模型中, 各节点的谐波源设置为谐波电流源, 设 $I_{n,k}$ 为节点 k 的额定电流, 谐波源发射水平范围为 $[0, \eta I_{n,k}]$, 其中, η 为谐波电流含量系数, 用于表征各运行场景中可能出现的最大谐波电流。

假设基础网架共 N 个节点, 不失一般性, 在 N 个节点均设置谐波源进行仿真。谐波源发射水平应遍历 $[0, \eta I_{n,k}]$ 范围, 以实现多场景的模拟。第一次样本生成共进行 M_1 次仿真通过在各节点设置监测装置, 记录 M_1 组谐波监测数据。进行各次仿真时, 基于 Sobol 序列采样在 $[0, \eta I_{n,k}]$ 范围内选取一个随机数, 作为节点谐波电流源发射值, Sobol 序列采样可在概率空间中对随机数进行均匀分布的采样,

适合 N 个节点的高维谐波源参数生成场景, 实现概率空间中可能场景的有效生成^[22]。因文章篇幅限制, 此处不详述 Sobol 序列采样的高维随机数生成方法。

第 1 阶段通过仿真生成谐波电流基础样本, 针对节点 j 生成的基础样本记为 $I_{1,j}$, 如式(1)所示, 为 $M_1 \times (N+1)$ 阶矩阵, $j = \{1, 2, \dots, N\}$ 。其中, $I_{1,e}$ 是 $M_1 \times N$ 阶的节点谐波源发射值矩阵, 表征各次仿真时各节点设置的谐波源发射水平; $I_{1,mon,j}$ 是 $M_1 \times 1$ 阶的节点 j 谐波电流监测值矩阵。

$$I_{1,j} = [I_{1,e}, I_{1,mon,j}] \quad (1)$$

式中: $I_{1,j}$ 的第 m 行数据为 $I_{1,j,m} = [i_{m,r}, y_{m,j}]$, $m = \{1, 2, \dots, M_1\}$, $r = \{1, 2, \dots, N\}$, r 为节点编号, $i_{m,r}$ 是 $1 \times N$ 维向量, 表示第 m 次仿真时, 各节点谐波源发射的谐波电流值 $y_{m,j}$ 是在第 m 次仿真中节点 j 的谐波电流监测值。

2.2 基于基础样本的节点谐波电流关联模型

第 1 阶段的基础样本, 是通过谐波潮流计算生成的。由于电网的节点数目多, 支路关系复杂, 在多谐波源的情况下, 各节点的谐波电流发射值与监测值呈非线性关系, 导致仿真计算耗时长、效率低。如果将多维非线性关系映射为高维线性关系, 并基于线性关系来进行样本生成, 则可有效提升生成效率。支持向量回归(support vector regression, SVR)算法在将多维数据非线性关系拟合为高维线性关系时, 具有较好的性能^[23]。

为此, 本节应用基础样本, 构建基于 SVR 的节点谐波电流关联模型, 利用机器学习算法拟合节点谐波电流关联关系, 以实现后续阶段的样本扩展, 提高分析效率。

2.2.1 数据初始化

为方便后续处理, 首先对 $I_{1,j}$ 内的数据进行归一化处理。

$$i'_{j,p,q} = \frac{i_{j,p,q} - i_{j,q,\min}}{i_{j,q,\max} - i_{j,q,\min}} \quad (2)$$

式中: $i_{j,p,q}$ 和 $i'_{j,p,q}$ 分别为归一化前、后 $I_{1,j}$ 中第 p 行第 q 列的谐波电流值; $i_{j,q,\max}$ 和 $i_{j,q,\min}$ 分别为 $I_{1,j}$ 内第 q 列的谐波电流最大值和最小值。本节以节点 j 为例, 分析监测节点 j 与各节点之间的谐波电流关系, 为简化表达, 在本节中以 i_j 代替 $i'_{j,p,q}$ 进行分析。

2.2.2 关联模型构建

1) 非线性表达

系统节点 j 的谐波电流监测值与各节点谐波源

电流发射值的关系, 如式(3)所示。

$$y_j = \sum_{k=1}^N f_{k,j}(i_k), k=1,2,\dots,N \quad (3)$$

式中: y_j 表示节点 j 的谐波电流监测值; $f_{k,j}(i_k)$ 表示节点 k 的谐波电流 i_k 在多谐波源作用下对节点 j 的谐波电流监测值的贡献。各节点谐波源共同作用, 其累加和体现为节点 j 的监测值 y_j 。

2) 线性化表达

式(3)表达了谐波电流监测值与各节点谐波源电流发射值之间的非线性关系; 通过核函数将其映射到高维空间, 使原本低维非线性的数据在高维空间的超平面上线性化。高维空间节点 j 的谐波电流监测值 $f_j(i_{m,r})$ 与各节点谐波电流发射值 $i_{m,r}$ 回归函数定义为

$$f_j(i_{m,r}) = \omega \Phi(i_{m,r}) + b \quad (4)$$

式中: $\Phi(i_{m,r})$ 是谐波电流 $i_{m,r}$ 映射到高维空间的非线性映射函数; ω 为线性权重, 反映超平面的方向; b 为偏置量, 反映超平面与原点之间的偏移量。

2.2.3 关联模型求解

为了体现阻抗参数误差的影响, 在 $f_j(i_{m,r})$ 两侧设置宽度为 ε 的间隔带, 设定谐波电流损失函数 E_ε , 如式(5)所示, 对在 ε 范围的误差不计入损失函数中, 实现对阻抗误差的模糊处理。 E_ε 用于评价 $f_j(i_{m,r})$ 与 $i_{m,r}$ 的线性拟合效果, E_ε 越小, 线性拟合关系越好。

$$E_\varepsilon(y_{m,j} - f_j(i_{m,r})) = \begin{cases} 0, & |y_{m,j} - f_j(i_{m,r})| \leq \varepsilon \\ |y_{m,j} - f_j(i_{m,r})| - \varepsilon, & |y_{m,j} - f_j(i_{m,r})| > \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

$$\varepsilon \in \left\{ \left| y_j((1 \pm \gamma)Z_n) - y_j(Z_n) \right|, \gamma \in [0, \gamma_{\max}] \right\} \quad (6)$$

式中: ε 为容忍误差; $y_j((1 \pm \gamma)Z_n)$ 和 $y_j(Z_n)$ 分别为各节点谐波源电流发射单位值情况下, 设定阻抗为 $(1 \pm \gamma)Z_n$ 和 Z_n 时, 节点 j 监测谐波电流值; γ_{\max} 为设定的最大阻抗误差系数。

因此, 求解 $f_j(i_{m,r})$ 与 $i_{m,r}$ 的线性关系问题转化为求解最小化 E_ε 问题, 即将式(4)表达为以下形式。

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{m=1}^{M_1} E_\varepsilon(y_{m,j} - f_j(i_{m,r})) \quad (7)$$

式中: C 为惩罚因子, C 越大代表对误差大于 ε 的惩罚越大。

由于谐波电流监测值 $y_{m,j}$ 可能不在所设定的间隔带中, 为了平衡模型的复杂度与估计准确度之间

的关系, 引入松弛变量 ξ_m 、 ξ_m^* , 允许部分监测值不在间隔带中, 将式(7)表达为以下形式。

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{m=1}^{M_1} (\xi_m + \xi_m^*) \quad (8)$$

$$\begin{cases} y_{m,j} - \omega \Phi(i_{m,r}) - b \leq \varepsilon + \xi_m \\ \omega \Phi(i_{m,r}) - y_{m,j} + b \leq \varepsilon + \xi_m^* \\ \xi_m, \xi_m^* \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

由于节点数量庞大, 求解上述公式的复杂度较高, 为了降低计算的复杂度, 引入拉格朗日函数将式(8)、式(9)转化为对偶问题。

$$\max_{\alpha, \alpha^*} \left[-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M_1} \sum_{l=1}^{M_1} (\alpha_m - \alpha_m^*) (\alpha_l - \alpha_l^*) K(i_{m,r}, i_{l,r}) - \sum_{m=1}^{M_1} \varepsilon (\alpha_m + \alpha_m^*) + \sum_{m=1}^{M_1} y_{m,j} (\alpha_m - \alpha_m^*) \right] \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{M_1} (\alpha_m - \alpha_m^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_m, \alpha_m^* \leq C \end{cases} \quad (11)$$

$$K(i_{m,r}, i_{l,r}) = \Phi(i_{m,r}) \Phi(i_{l,r}) \quad (12)$$

式中: α_m 、 α_m^* 为样本 m 的拉格朗日系数, 分别表示谐波电流值在原始问题和对偶问题中对超平面的影响权重; α_l 、 α_l^* 分别为样本 l 的拉格朗日系数; $K(i_{m,r}, i_{l,r})$ 为核函数。

通过求解式(10)、式(11), 得到最优解 α_m 、 α_m^* , 可进一步得到 ω^* 和 b^* 为

$$\omega^* = \sum_{m=1}^{M_1} y_{m,j} (\alpha_m - \alpha_m^*) \Phi(i_{m,r}) \quad (13)$$

$$b^* = y_{m,j} - \sum_{m=1}^{M_1} \alpha_m^* y_{m,j} (i_{m,r}^T i_{m,r}) \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(4), 并用核函数表示可得回归函数为

$$f_j(i_{r,m}) = \sum_{m=1}^{M_1} (\alpha_m - \alpha_m^*) K(i_{m,r}^T, i_{m,r}) + b^* \quad (15)$$

通过上述步骤, 求得监测节点 j 的 $f_j(i_{r,m})$ 与 $i_{m,r}$ 的线性关系。同理, 通过 SVR 算法可估计任一节点的谐波电流监测值与其他各节点谐波源电流发射值的关系, 将谐波电流的潮流计算简化为基于 SVR 的谐波电流关联模型。应用该关联模型能够快速、大量地生成考虑参数误差的谐波电流样本, 在本文中称为第 2 阶段样本生成, 它能有效克服应用谐波潮流计算生成基础样本的耗时长、泛化性差的问题, 实现不同谐波源接入系统的全场景仿真。

2.3 第2阶段样本生成：扩展样本

在第1阶段，通过 M_1 次仿真，获得 M_1 组基础样本，每次仿真等步长 $\eta I_{n,k} / M_1$ 设置节点的谐波电流发射值，实现谐波发射值从 $0 \sim \eta I_{n,k}$ 的场景遍历。由于第1阶段仿真耗时较长，执行的仿真次数有限，设置节点谐波电流发射值的步长较大。在第2阶段，应用关联模型生成扩展样本，缩短步长，增加仿真次数，实现对谐波发射的全场景细化分析。

在第2阶段，共进行 M_2 次仿真， $M_2 \gg M_1$ ，各节点的谐波电流发射值为关联模型的输入数据，节点谐波电流监测值为其输出数据。对于输入数据，通过 Sobol 序列采样在 $[0, \eta I_{n,k}]$ 范围内为各节点设置谐波电流发射值，各发射值随机采样，在概率空间中均匀分布。将输入数据记为节点谐波源发射矩阵 $I_{2,e}$ ，维度为 $M_2 \times N$ 。在关联模型中输入 $I_{2,e}$ ，得到对应场景下节点 j 的 $M_2 \times 1$ 阶谐波电流监测值矩阵 $I_{2,mon,j}$ 。同第一阶段的样本记录方法，谐波电流扩展样本 $I_{2,j}$ 是由 $I_{2,e}$ 与 $I_{2,mon,j}$ 组成，维度为 $M_2 \times (N+1)$ 。

2.4 第3阶段样本生成：混合样本

第2阶段扩展样本代表系统中 M_2 种可能的谐波影响的场景，具有普适和泛化效果，但尚不能明确反映节点间的谐波影响程度。因此，提出第3阶段的混合样本构建方法，基本思路为替换 $I_{2,e}$ 中某列的数据，对比分析该列代表的节点谐波注入值改变时，在节点 j 的响应特性。进一步，提出谐波敏感度计算方法，量化各节点谐波注入对节点 j 的影响程度，作为监测装置优化配置的依据。

第3阶段混合样本的构建方法如下。

1) 将 $I_{2,e}$ 拆分为两个 $0.5M_2 \times 1$ 阶矩阵 $I_{2,e}^a$ 和 $I_{2,e}^b$ ，如式(16)所示，各代表 $0.5M_2$ 次仿真样本。

$$I_{2,e} = \begin{bmatrix} I_{2,e}^a \\ I_{2,e}^b \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$I_{2,e}^a = \begin{bmatrix} i_{1,1}^a & \cdots & i_{1,N}^a \\ i_{2,1}^a & \cdots & i_{2,N}^a \\ \vdots & & \vdots \\ i_{0.5M_2,1}^a & \cdots & i_{0.5M_2,N}^a \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$I_{2,e}^b = \begin{bmatrix} i_{1,1}^b & \cdots & i_{1,N}^b \\ i_{2,1}^b & \cdots & i_{2,N}^b \\ \vdots & & \vdots \\ i_{0.5M_2,1}^b & \cdots & i_{0.5M_2,N}^b \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中： $i_{p,q}^a$ 与 $i_{p,q}^b$ 分别是 $I_{2,e}^a$ 与 $I_{2,e}^b$ 中第 p 次仿真时第

q 个节点谐波电流发射值。将 $I_{2,e}^a$ 与 $I_{2,e}^b$ 分别代入到关联模型中，得到两个 $0.5M_2 \times 1$ 阶的监测节点 j 的监测谐波电流矩阵 $I_{2,mon,j}^a$ 与 $I_{2,mon,j}^b$ 。

2) 为了判断各节点谐波电流发射值对节点 j 谐波电流监测值的影响，将 $I_{2,e}^a$ 与 $I_{2,e}^b$ 混合，即用 $I_{2,e}^b$ 的第 h 列替换 $I_{2,e}^a$ 的第 h 列，各列逐一替换，可得到 N 个 $0.5M_2 \times N$ 阶谐波电流发射值混合矩阵 $I_{3,e}^h$ ， $h = \{1, 2, \dots, N\}$ 。式(19)为第 h 列元素被替换，形成的混合矩阵 $I_{3,e}^h$ 。

$$I_{3,e}^h = \begin{bmatrix} i_{1,1}^a & \cdots & i_{1,h-1}^a & i_{1,h}^b & \cdots & i_{1,N}^a \\ i_{2,1}^a & \cdots & i_{2,h-1}^a & i_{2,h}^b & \cdots & i_{2,N}^a \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ i_{0.5M_2,1}^a & \cdots & i_{0.5M_2,h-1}^a & i_{0.5M_2,h}^b & \cdots & i_{0.5M_2,N}^a \end{bmatrix} \quad (19)$$

3) 将 $I_{3,e}^h$ 代入关联模型中，得到对应的 $0.5M_2 \times 1$ 阶的谐波电流监测值矩阵 $I_{3,mon,j}^h$ ，通过替换不同的列 h ，共可得到对应的 N 组 $I_{3,mon,j}^h$ 。同基础样本与扩展样本的表达方式，将 $I_{3,e}^h$ 与 $I_{3,mon,j}^h$ 组合，得到 N 个 $0.5M_2 \times (N+1)$ 阶谐波电流混合样本 $I_{3,j}^h$ 。

3 节点谐波源敏感度计算

通过第2、3阶段样本生成，体现了多谐波源共同作用下，节点 h 的谐波注入对节点 j 的谐波监测值的影响。本文提出谐波敏感度指标，在多扰动注入背景下，量化该影响作用。

传统谐波敏感度指标是通过分析系统阻抗关系^[24]，以谐波转移阻抗等刻画节点 h 的谐波注入对节点 j 的影响，适用于单一扰动源场景的刻画。但是，新型配电网大量光储充等电力电子非线性负荷的接入，各节点都可能存在谐波源。多谐波源背景下，节点 h 的谐波电流发射值与节点 j 的监测值呈非线性关系，仅用各节点谐波源分别作用时的效果叠加，难以表征在多谐波源相互作用下对节点 j 监测值的影响。

本文尝试将节点 j 的监测值表达为多谐波源注入值的影响效果组合，如式(20)所示，通过计算谐波源组合对谐波电流监测值的方差贡献度，量化它们对监测值的影响程度。

$$y_j = g_{0,j} + \sum_{h=1}^N g_{h-j}(i_h) + \sum_{1 \leq h < k \leq N} g_{h,k-j}(i_h, i_k) + \cdots + g_{1,2,\dots,N-j}(i_1, \dots, i_N) \quad (20)$$

式中： $g_{0,j}$ 为常数项；下标 $h-j$ 、 $h,k-j$ 、 $1,2,\dots,N-j$ 分别代表节点 h 、节点 h,k 组合、节点 $1,2,\dots,N$ 组合

对监测节点 j 的影响; g_{h-j} 、 $g_{h,k-j}$ 、 $g_{1,2,\dots,N-j}$ 分别指仅节点 h 、节点 h 和 k 的谐波源共同作用、所有节点谐波源共同作用时, 对节点 j 谐波电流监测值的影响函数; 式中省略号指各节点谐波源不同组合作用下的所有影响函数。

式(20)中, 各个子项是关于其包含的各节点谐波电流的因变量。以含有 m 个节点谐波电流的子项为例, 对其中节点 h 的谐波注入电流 i_h 进行积分, 存在如下关系:

$$\int_0^{\eta I_{n,h}} g_{1,2,\dots,m-j}(i_1, i_2, \dots, i_m) di_h = 0, h=1, 2, \dots, m \quad (21)$$

由式(21)可知, 式(20)中的各子项之间是正交的, 因此可求得常数项 g_{0-j} 如式(22)所示。

$$g_{0-j} = \frac{1}{\eta^N \prod_{h=1}^N I_{n,h}} \int \dots \int_E y_j di_1 \dots di_N \quad (22)$$

式中: E 为由各节点谐波电流组成的参数域, $E = \{(i_1, i_2, \dots, i_N); 0 \leq i_h \leq \eta I_{n,h}, h=1, 2, \dots, N\}$; i_h 为各节点谐波电流; $\eta I_{n,h}$ 为节点 h 设定的谐波源电流最大值。

结合式(22), 求取式(20)中的单节点和两节点谐波源影响函数 g_{h-j} 与 $g_{h,k-j}$ 分别如式(23)、式(24)所示。

$$g_{h-j}(i_h) = -g_{0-j} \eta^{N-1} \prod_{h=1}^{N-1} I_{n,\sim h} + \int \dots \int_0^{\eta I_{n,\sim h}} y_j di_{\sim h} \quad (23)$$

$$g_{h,k-j}(i_h, i_k) = -(g_{0-j} + g_{h-j}(i_h) + g_{k-j}(i_k)) \times \eta^{N-2} \prod_{h=1}^{N-2} I_{n,\sim h,k} + \int \dots \int_0^{\eta I_{n,\sim h,k}} y_j di_{\sim h,k} \quad (24)$$

式中: $i_{\sim h}$ 与 $i_{\sim h,k}$ 分别表示除 i_h 、除 i_h 与 i_k 之外的节点谐波电流; $\eta I_{n,\sim h}$ 与 $\eta I_{n,\sim h,k}$ 分别表示除 i_h 、除 i_h 与 i_k 之外的节点谐波电流最大值。同理, 式(20)中所有谐波源不同组合对应的关系均可求得。

基于方差的敏感度分析能够捕捉到非线性关系以及谐波源间复杂的影响作用, 适用于包含多个谐波源, 且谐波源存在非线性关系和相互影响作用的模型。因此, 定义谐波电流监测值 y_j 的总方差 V_j 与 m 阶偏方差 $V_{1,\dots,m-j}$ 分别为

$$\begin{cases} V_j = \int \dots \int_E (y_j - g_{0-j}) di_1 \dots di_N \\ V_{1,\dots,m-j} = \int_0^{\eta I_{n,1}} \dots \int_0^{\eta I_{n,m}} g_{1,\dots,m-j}^2(i_1, \dots, i_m) di_1 \dots di_m \end{cases} \quad (25)$$

式中: $m \leq N$ 。

对式(20)进行换相, 并在参数域 E 中进行平方与积分处理, 结合式(25)可得到:

$$V_j = \sum_{h=1}^N V_{h-j} + \sum_{1 \leq h < k \leq N} V_{h,k-j} + \dots + V_{1,2,\dots,N-j} \quad (26)$$

定义节点 j 谐波电流监测值对节点 h 谐波源电流发射值的敏感度 $S_{T,j}^h$, 表达式如式(27)所示。

$$S_{T,j}^h = 1 - \frac{V_{\sim h-j}}{V_j} \quad (27)$$

式中: $V_{\sim h-j}$ 指除节点 h 外, 其他节点计算所得的 $N-1$ 阶偏方差。

将式(27)离散化为

$$V_j = \sum_{k=1}^M (y_{j,k} - \bar{y})^2 \quad (28)$$

$$V_{\sim h-j} = V_j - \sum_{k=1}^M (y_{\sim h-j,k})^2 \quad (29)$$

式中: \bar{y} 指监测值的平均值。

结合式(28)与式(29), 并将扩展样本与混合样本代入, 计算可得 $S_{T,j}^h$ 为

$$S_{T,j}^h = \frac{1}{M_2 \times V_{ar}(I_{2,mon,j}^{a+b})} \sum_{\xi=1}^{0.5M_2} (i_{2,mon,j,\xi}^a - i_{3,mon,j,\xi}^h)^2 \quad (30)$$

$$I_{2,mon,j}^{a+b} = \begin{bmatrix} I_{2,mon,j}^a \\ I_{2,mon,j}^b \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$V_{ar}(I_{2,mon,j}^{a+b}) = \frac{1}{M_2} \sum_{\eta=1}^{M_2} (i_{2,mon,j,\eta}^{a+b} - \mu)^2 \quad (32)$$

式中: $i_{2,mon,j,\xi}^a$ 与 $i_{3,mon,j,\xi}^h$ 指 $I_{2,mon,j}^a$ 与 $I_{3,mon,j}^h$ 中第 ξ 行对应谐波电流监测值; μ 为 $I_{2,mon,j}^{a+b}$ 中所有元素的平均值; $i_{2,mon,j,\eta}^{a+b}$ 为 $I_{2,mon,j}^{a+b}$ 中第 η 行的谐波电流监测值。

通过式(30)一式(32), 可得节点 j 对节点 h 的敏感度 $S_{T,j}^h$; 分别计算节点 j 对节点 $1, 2, \dots, N$ 的敏感度, 构建 $N \times 1$ 阶的节点 j 敏感度矩阵 $S_{T,j}$ 。

对各节点 $j=1, 2, \dots, N$ 逐一分析, 可得各节点的敏感度矩阵, 组合得到 $M \times N$ 阶的节点敏感度矩阵 S_T , S_T 中的第 p 行第 q 列元素代表节点 p 谐波电流发射值对节点 q 谐波电流监测值的影响程度。构建 S_T , 支撑后续的监测装置优化配置。

4 基于敏感度矩阵的监测装置优化配置

本文提出一种基于敏感度矩阵的监测装置优化配置方法, 配置后的监测数据可用于谐波状态估计及谐波溯源的研究。本文应用现有文献提出的溯源方法^[15]进行谐波溯源分析; 提出谐波溯源误差指标体系, 将溯源误差指标最小化设定为优化配置的目标。

在约束条件方面, 考虑了监测装置配置的经济性与技术性约束。经济性约束是指使用最少的监测装置, 获取谐波信息, 支撑谐波溯源工作。技术性约束包括 3 个方面: 1) 为确保监测装置采集谐波信息的丰富性, 基于节点敏感度矩阵 \mathbf{S}_T , 提出敏感度集中性约束, 使监测节点相对邻近节点敏感度最大; 2) 对于可能存在的敏感度相对较大的节点聚集于某一区域, 导致监测装置配置过于集中, 造成区域外部分状态不可观的问题, 提出敏感度分散性约束, 确保监测装置配置的全局覆盖; 3) 提出谐波溯源误差约束, 以保障谐波溯源准确性。

4.1 目标函数

满足配置方法约束条件的优化配置方案, 可能有多组, 在目标函数中, 选取使谐波溯源误差最小的一组解为最优解。

$$P_{\text{best}} = \min_{r_{i,e}=\{1,\dots,R\}} \{\theta_{r_{i,e}}\} \quad (33)$$

式中: P_{best} 指监测装置最优配置方案; $r_{i,e}$ 指满足经济性和技术性约束的配置方案编号, 方案个数为 R ; $\theta_{r_{i,e}}$ 指 $r_{i,e}$ 方案中对应谐波溯源综合误差, 误差求解算法在 4.2.1 节中详述。

4.2 约束条件

4.2.1 技术性约束条件

1) 溯源误差约束

监测装置配置后, 可获取多个节点的谐波监测值, 采用文献[15]的算法进行谐波溯源, 可得溯源估计值, 构建谐波溯源误差指标体系, 将估计值与仿真中设定的谐波源真实值进行比较。

指标体系包含谐波电流幅值误差 θ_A 、相角误差 θ_ϕ 与谐波源定位偏差度 θ_L , 其计算公式如下。

$$\theta_A = \frac{1}{T_{\text{sim}} H_n} \sum_{p=1}^{T_{\text{sim}}} \sum_{s=1}^{H_n} \left| \frac{A_{p,s}^{\text{real}} - A_{p,s}^{\text{est}}}{A_{p,s}^{\text{real}}} \right| \quad (34)$$

$$\theta_\phi = \frac{1}{T_{\text{sim}} H_n} \sum_{p=1}^{T_{\text{sim}}} \sum_{s=1}^{H_n} \left| \frac{\varphi_{p,s}^{\text{real}} - \varphi_{p,s}^{\text{est}}}{\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{min}}} \right| \quad (35)$$

$$\theta_L = 1 - \frac{1}{T_{\text{sim}} H_n} \sum_{p=1}^{T_{\text{sim}}} \sum_{s=1}^{H_n} c_{p,s} \quad (36)$$

$$c_{p,s} = \begin{cases} 1, & \text{谐波源 } s \text{ 所在节点被估计为谐波源} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (37)$$

式中: T_{sim} 指谐波溯源的仿真次数; H_n 指仿真时设定谐波源的个数; $A_{p,s}^{\text{real}}$ 、 $A_{p,s}^{\text{est}}$ 、 $\varphi_{p,s}^{\text{real}}$ 与 $\varphi_{p,s}^{\text{est}}$ 分别指谐波源 s 在第 p 次仿真时的幅值真实值、幅值估计值、相角真实值与相角估计值; φ_{max} 与 φ_{min} 分别指在 T_{sim} 次仿真中谐波源设定相角范围的最大值与最小值;

$c_{p,s}$ 指谐波源 s 在第 p 次仿真时的谐波溯源结果。

为统一表达谐波溯源误差, 定义谐波溯源综合误差 θ , 计算公式如式(38)。

$$\theta = \omega_A \theta_A + \omega_\phi \theta_\phi + \omega_L \theta_L \quad (38)$$

式中: ω_A 、 ω_ϕ 与 ω_L 分别表示 θ_A 、 θ_ϕ 与 θ_L 的对应权重。其中, $\omega_A + \omega_\phi + \omega_L = 1$, 各权重可根据实际工作中对各项溯源结果指标的重视程度进行设置。在本文算例中, 分别设为 0.3、0.3 和 0.4, 强调谐波源定位的结果准确性。

设定最大谐波溯源的误差 θ_n , 对监测装置配置方案进行约束, 约束条件为

$$\theta_n \geq \theta_{r_i} \quad (39)$$

式中: r_i 为监测装置配置方案编号; θ_{r_i} 为第 r_i 个监测装置配置方案的谐波溯源综合误差。

设置仿真条件, 进行谐波误差估计时, 可兼顾准确性和计算量, 进行合理设置。本文算例中, 考虑对系统造成较大污染的谐波源数量有限, 设置谐波源数量 $H_n \leq N/6$, 在各次仿真中, 谐波源节点随机设置, 谐波源发射值范围为 $[0.05I_{n,k}, \eta I_{n,k}]$; 其他节点的谐波发射值设置在 $0.05I_{n,k}$ 以下, 以反映各节点均含一定数量的电力电子等非线性设备的现状。

2) 敏感度集中性约束

监测节点对邻近节点的敏感度越大, 代表能获取越丰富的谐波信息。因此, 计算监测节点对邻近区域内节点的敏感度总和, 作为监测点优化配置的重要参考指标。

$$S_j = \sum_{q=1}^{1+n \times l_j} S_{T,g-j,q} \quad (40)$$

$$n = \left\lfloor \frac{N}{2X_{\text{mon}}} \right\rfloor \quad (41)$$

式中: S_j 指节点 j 对邻近区域中所有节点的敏感度总和; l_j 为节点 j 连接的支路数; 邻近区域是指以节点 j 为中心, 各支路最邻近节点 j 的 n 个节点所构成的区域, 共计 $(1+n \times l_j)$ 个节点; g 是邻近区域中各节点的编号集合; $S_{T,g-j,q}$ 为节点 j 对集合 g 内各节点的敏感度, 其值可从 \mathbf{S}_T 中读取。为保证监测装置的覆盖性, n 的设定如式(41)所示, 由每次求解时代入的监测装置数量 X_{mon} 和节点总数 N 决定。

所以, 敏感度集中性约束如式(42)所示。

$$S_j \geq S_{g'} \quad (42)$$

式中: g' 指节点 j 的相邻节点编号, 即节点 j 的敏感度必须大于其相邻节点的敏感度。

3) 敏感度分散性约束

为了避免监测装置配置过于集中, 对系统节点覆盖不均匀, 提出敏感度分散性约束, 即所有监测装置的邻近区域节点集合的并集等于系统所有节点集合 G_N , 如式(43)所示。

$$\bigcup_{k \in K} g_k = G_N \quad (43)$$

式中: g_k 指节点 k 邻近区域内的节点编号集合; K 指安装监测装置的节点编号集合。

4.2.2 经济性约束条件

随着监测装置数量增加, 溯源误差会随之降低; 但是, 当监测装置达到一定数量时, 误差降低程度可能就不再明显或突出。因此, 在满足技术性约束的基础上, 选取最少数量的监测装置配置方案, 可实现最优性价比。

$$O_{\min} = \min_{r_e \in \{1, \dots, R\}} \{O_{r_e}\} \quad (44)$$

$$O_{\min} \leq X_{\max} \quad (45)$$

式中: O_{\min} 指所有配置方案中最少的监测装置数量; r_e 指满足技术性约束的配置方案编号; O_{r_e} 指配置方案 r_e 的监测装置数量; X_{\max} 指电网公司可接受的最大监测装置数量。

4.3 求解方法

本文采用二进制粒子群优化(binary particle swarm optimization, BPSO)算法求解监测装置优化配置问题, BPSO 算法适用于求解离散二元的监测装置优化配置问题。由于篇幅限制, 此处不详细介绍 BPSO 算法的具体过程, 详见文献[25]。通过设定监测装置优化配置的目标函数与约束条件, 并通过 BPSO 算法进行求解, 最终得到监测装置的最优配置方案。

5 算例分析

5.1 算例设置

本文采用 IEEE33 节点模型进行算例分析, 验证本文所提方法的准确性及鲁棒性。其中, 节点 1 为变电站出线侧, 作为整个系统的电源输入, 不计入分析, 即 $N = 32$ 。系统的基准电压为 10.5 kV, 基准频率为 50 Hz, 基准功率为 100 MVA, 各元件参数与负荷参数的设置与文献[26]一致。算例采用 3 次谐波数据进行分析验证, 其他频次谐波的计算方法类似。谐波源参数设置范围如表 1 所示。

表 1 谐波源参数范围

Table 1 Parameter range for harmonic sources

参数	参数值	参数	参数值
幅值	$[0.05I_{n,k}, 0.1I_{n,k}]$	谐波源数量	1~5
相角	$[0, 90^\circ]$	谐波源节点	2~33

5.2 算法验证 1: 多场景谐波电流样本生成

5.2.1 数据样本生成

生成第 1 阶段基础样本的仿真参数设定如下: 谐波电流含量的系数 η 为 0.1; 阻抗误差系数 γ 为 0.1。通过 2.1 节所提方法, 生成 500 组谐波电流数据, 假设监测节点为节点 8, 构建谐波电流基础样本 $I_{1,8} = [I_{1,e}, I_{1,mon,8}]$ (维度为 500×33)。

5.2.2 关联模型的效果验证

为验证本文所提关联模型的准确性, 采用长短时记忆(long short-term memory, LSTM)网络、径向基函数(radial basis function, RBF)及随机森林(random forest, RF)生成关联模型进行对比验证。

将 $I_{1,e}$ 与 $I_{1,mon,8}$ 通过 2.2 节方法生成关联模型。将 500 组样本按 4:1 的比例分为 SVR 的训练集与测试集, 模型测试效果及对比结果如图 2 及表 2 所示。

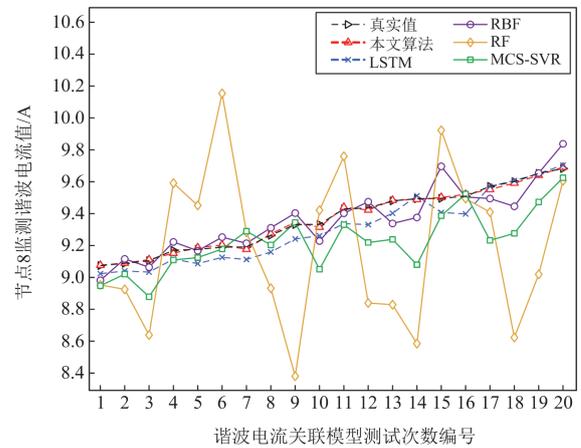


图 2 谐波电流关联模型测试效果

Fig. 2 Test effect of harmonic current correlation model

由于篇幅有限, 图 2 仅展示了前 20 个测试样本的真实值、估计值, 横坐标表示测试样本序号, 纵坐标表示节点 8 的谐波电流估计值, 黑色曲线为第 1 阶段样本生成的仿真值(即真实值), 红色、蓝色、紫色和黄色散点和曲线分别表示本文算法、LSTM、RBF、RF 计算得到的谐波电流估计值。由图可明显发现, 代表本文算法的红色曲线与黑色曲线几乎完全重合, 其估计值相对真实值最大偏差仅为 0.018 A, 具有较高的准确性。LSTM、RBF、RF 方法计算所得最大偏差分别为 0.111、0.200、0.964 A, 偏差较大。

表 2 分析了 100 组测试结果, 分别对比了本文算法与对比算法的 3 个性能指标, 包括决定系数(R-square, R^2)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)与计算总用时, 用来衡量评估结果的准确性与算法计算量。 R^2 与 MAE 指标计算公式如下。

$$A_{R^2} = 1 - \frac{\sum_{p=1}^{100} (y_{8,p} - f_{8,p})^2}{\sum_{p=1}^{100} (y_{8,p} - \bar{y}_{8,p})^2} \quad (46)$$

$$A_{MAE} = \frac{1}{100} \sum_{p=1}^{100} |y_{8,p} - f_{8,p}| \quad (47)$$

式中： $y_{8,p}$ 、 $f_{8,p}$ 与 $\bar{y}_{8,p}$ 分别指节点 8 监测谐波电流的真实值、估计值、100 个真实值的平均值。

表 2 谐波电流关联模型测试指标结果

Table 2 Test index results of harmonic current correlation model

指标	本文算法	LSTM	RBF	RF	MCS-SVR
R^2	0.999	0.996	0.986	0.648	0.668
MAE	0.013	0.049	0.127	0.739	0.680
总用时/s	334	26219	574	2100	364

表中 R^2 指标越接近于 1, MAE 指标越接近于 0, 即所得估计值和真实值偏差越小。由表 2 可知, 本文算法的 R^2 为 0.999, MAE 为 0.013, 总用时最短, 相对于对比算法, 呈现了最优的性能指标。这是由于 SVR 算法相对其他算法更适用于刻画谐波的非线性关系, 故表现出较高的准确性。

5.2.3 采样算法的效果验证

为验证本文在 2.1 节与 2.3 节中采用的 Sobol 序列采样算法的适用性, 以蒙特卡洛(Monte Carlo simulation, MCS)法为对比方法, 以其采样结果分别建立关联模型, 应用图 2 及表 2 的关联模型指标性能反映两种采样方法的性能。

图 2 中, 绿色曲线为 MCS 采样并通过 SVR 算法构建关联模型的测试结果, 相对本文算法的偏差更大, 最大偏差达到 0.4142 A。表 2 所得指标结果 (R^2 为 0.668, MAE 为 0.680) 均相对较差, 这是由于 MCS 为概率采样, 并不适用于多场景谐波值的采样, 证明了本文所用 Sobol 采样算法具有更强的适用性。

5.3 算法验证 2: 节点谐波源敏感度计算

基于 SVR 算法生成谐波电流关联模型, 通过 2.3 节所提方法, 生成第 2 阶段 32 组扩展样本 $I_{2,j} = [I_{2,e}, I_{2,mon,j}]$ (维度为 4000×33)。通过 2.4 节所提方法, 生成第 3 阶段的 32×32 组混合样本 $I_{3,j}^h = [I_{3,e}^h, I_{3,mon,j}^h]$ (维度为 2000×33)。

5.3.1 敏感度计算结果

基于扩展样本与混合样本, 通过第 3 节所提算法, 对 32 个节点进行敏感度计算, 得到各监测节点的谐波源敏感度如图 3 所示。

图 3 展示了监测节点对谐波源节点的敏感度

值, 横坐标为监测节点编号, 纵坐标为谐波源节点编号, 气泡不同的颜色与大小代表不同的敏感度值, 颜色对应敏感度值如图右侧色条所示, 气泡越大, 颜色越红, 代表敏感度值越大。监测节点对节点本身的敏感度是最大的, 图中呈现为对角线的偏红色气泡。

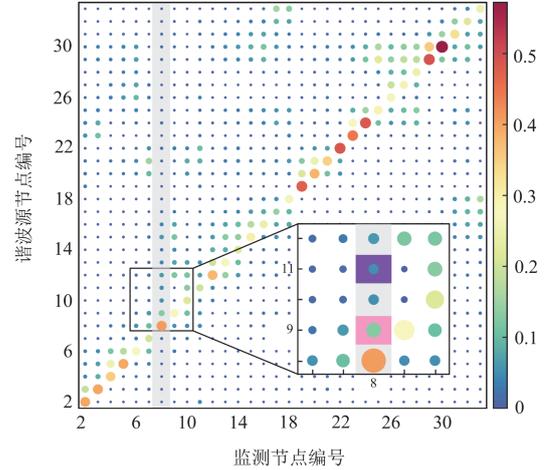


图 3 各监测节点对谐波源节点的敏感度

Fig. 3 Sensitivity of each monitoring node to harmonic source nodes

图 3 中灰色背景区域为监测节点 8 对各节点的敏感度值, 粉色框与紫色框内气泡分别为节点 8 对节点 9、11 的敏感度值, 分别为 0.129 和 0.050。粉色框气泡比紫色框气泡更大, 表明节点 8 对节点 9 更敏感。节点 30 为监测节点时, 对本节点(即节点 30)敏感度最大, 为 0.572。

5.3.2 敏感度指标的合理性验证

为了验证本文算法所得敏感度的合理性, 设计如下对比实验。删除高或低相关度节点的样本信息, 形成信息不全面条件下的关联模型。对比上述模型节点 8 谐波电流估计值与真实值的偏差情况, 对敏感度指标的合理性进行评估。

图 4 中横坐标表示测试样本序号, 仅列出前 20 次的测试结果供分析, 纵坐标表示节点 8 的谐波电流估计值或真实值, 黑色虚线代表真实值曲线, 棕、蓝、绿、紫、黄与红色线分别代表从基础样本中去掉节点 2、8、9、13、14、15 的样本后生成对应关联模型所得估计值曲线, 由图 3 可知对应节点的敏感度从大到小的排序为 8、9、15、13、14、2。

如图 4 所示, 在去掉不同节点样本后, 构建的关联模型谐波电流估计值与真实值均出现一定偏差, 最大偏差出现在去除节点 8(蓝色线)样本后, 为 2.124 A; 在去除敏感度较小的节点时, 如节点 2(棕

色线), 去除后估计值曲线与真实值曲线近乎重合, 最大偏差仅为 0.015 A, 100 组测试结果的性能指标 (R^2 为 0.999, MAE 为 0.014) 仍然较好。在去除敏感度较大的节点样本信息时, 如节点 9, 所得红色曲线与真实值曲线偏差较大, 最大偏差为 1.4617 A, 关联模型性能指标 (R^2 为 0.808, MAE 为 0.566) 较差; 去除节点 13(紫色)、14(黄色)、15(红色) 后的最大偏差分别为 1.038、0.721、1.470 A。因此, 本文方法得到的谐波电流敏感度结果合理, 能够较准确地表征监测节点与其他节点谐波源之间的影响关系。

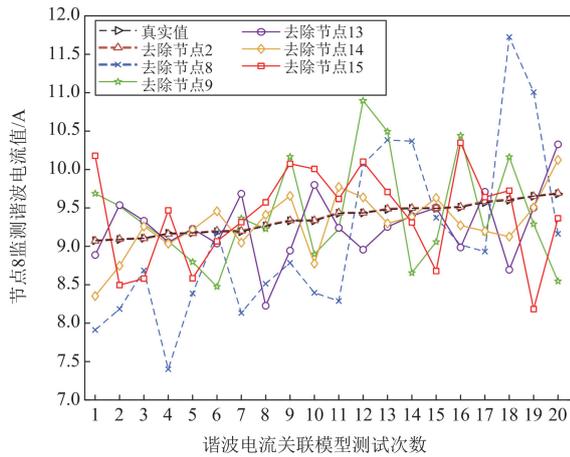


图 4 去除部分节点谐波数据后的谐波电流关联模型测试
Fig. 4 Harmonic current correlation model test after removing some node harmonic data

5.4 算法验证 3: 监测装置优化配置

5.4.1 监测装置配置结果

求解方法及约束条件设定的初始阈值如表 3 所示; 根据第 4 节所提方法进行监测装置优化配置, 配置结果如图 5 所示。

表 3 优化配置初始阈值设定

Table 3 Optimized placement initial threshold setting

指标	θ_A	θ_ϕ	θ_L	θ_n	X_{\max}
设定值	0.1	0.03	0.25	0.15	11

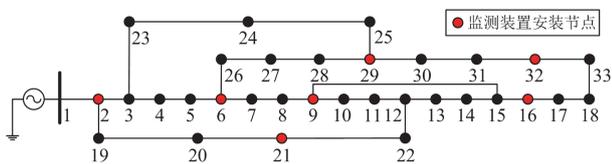


图 5 监测装置优化配置结果

Fig. 5 Result of the optimized placement for monitoring devices

本文方法共配置了 7 台监测装置, 配置节点编号为 {2、6、9、16、21、29、32}, 监测装置数量的

配置占比为 21.8%, 即合理配置 7 台监测装置时即可满足谐波溯源的准确性要求。

5.4.2 配置方法的适用性验证

采用表 1 设定的谐波源参数, 随机设置谐波源。对不同数量的监测装置进行优化配置, 在每种监测装置及谐波源数量下各进行 200 次谐波溯源验证, 估计所得谐波电流幅值误差 θ_A 、相角误差 θ_ϕ 与谐波源定位偏差度 θ_L 如图 6 与图 7 所示。

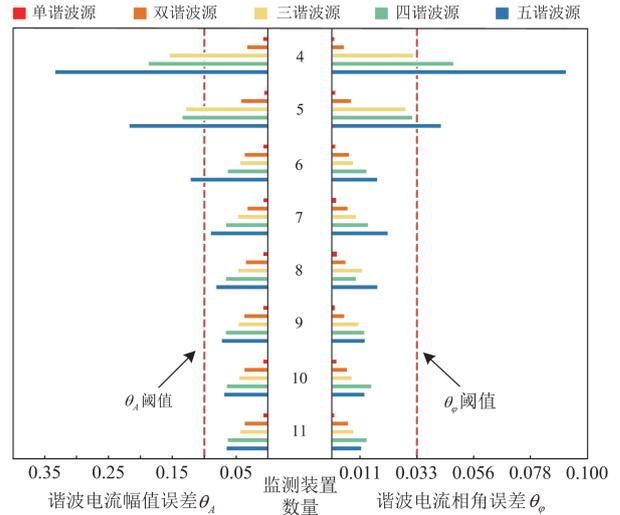


图 6 谐波源幅值和相角误差

Fig. 6 Amplitude and phase angle errors of harmonic sources

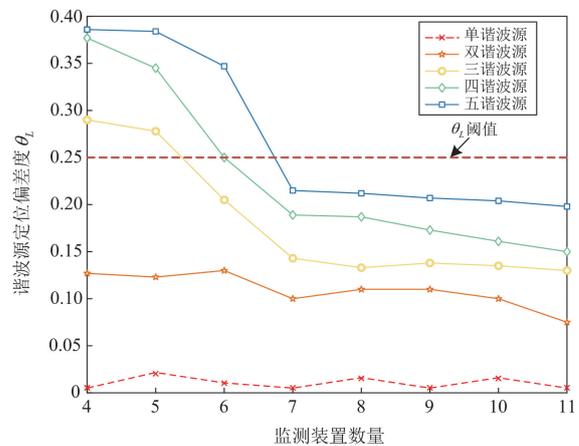


图 7 谐波源定位偏差度

Fig. 7 Deviation of harmonic source positioning

图 6 左侧为谐波电流幅值误差 θ_A 柱状图, 左下坐标为幅值误差 θ_A , 右侧为相角误差 θ_ϕ 柱状图, 右下坐标为相角误差 θ_ϕ , 中间坐标为监测装置数量, 棕色虚线为设定的误差阈值, 红色、橙色、黄色、绿色与蓝色柱的长度分别代表谐波源数量为 1、2、3、4、5 时的对应误差。由图 6 可知, 当监测装置数量

逐渐增加时, 谐波溯源的误差逐渐降低; 当监测装置数量小于 7 时, 各种谐波源数量下谐波溯源结果的 θ_A 和 θ_ϕ 不能同时满足阈值约束; 监测装置数量大于等于 7 时, θ_A 与 θ_ϕ 最大偏差分别为 0.091 与 0.022, 均满足设定幅值与相角阈值约束。

图 7 中, 横坐标为监测装置数量, 纵坐标为谐波源定位偏差度 θ_L , 棕色虚线为 θ_L 阈值, 红色、橙色、黄色、绿色与蓝色曲线分别代表谐波源数量为 1、2、3、4、5 时的误差曲线。由图 7 可得, 当监测装置数量大于等于 7 时, 各种谐波源数量下谐波溯源结果的 θ_L 均满足阈值约束, 谐波源定位最大偏差度为 0.215。

随着监测装置数量增加, 谐波溯源误差逐渐减小; 当监测装置数量大于 7 后, 增加监测装置数量去提升谐波溯源准确性的性价比逐渐降低。因此, 本文所提配置方法能够求解最优性价比下的配置方案, 具有较强的工程适用性。

5.4.3 配置方法的对比验证

对比不同监测节点配置方法下进行谐波溯源的准确性, 验证所提配置方法的性能。不同监测装置配置方案如表 4 所示。

表 4 不同监测装置配置方案

Table 4 Different monitoring device placement options

编号	来源	监测装置配置节点编号
1	本文方法[最优]	2、6、9、16、21、29、32
2	本文方法[非最优]	2、6、8、15、20、25、33
3	文献[15]方法	3、4、5、6、8、12、15、18、29
4	文献[15]方法 2	3、4、5、6、8、12、15
5	文献[15]方法 3	3、5、8、12、15、18、29

表 4 中, 方案 1 为本文方法求解方案中的最优解; 方案 2 为本文方法解集中的非最优解; 方案 3 为文献[15]配置方案; 为对比相同监测装置数量下文献[15]方法的配置方案, 方案 4 与方案 5 为以方案 3 为基础, 随机去除两个监测装置后的配置方案。方案 3 配置监测装置数量占比为 28.1%, 高于方案 1、2、4、5 的占比 21.8%。根据不同的监测装置配置方案进行谐波溯源, 谐波源定位偏差度 θ_L 如图 8 所示。

图 8 中, 横坐标为谐波源数量, 纵坐标为谐波源定位偏差度 θ_L , 红色、橙色、蓝色、绿色与黄色线分别代表方案 1、2、3、4、5 所得谐波源定位偏差度曲线。如图 8 所示, 方案 1 的 θ_L 在各种谐波源数量下相对最小, 最大偏差度为 0.215; 方案 3 的次之, 最大偏差度为 0.222。

同等配置数量下, 方案 4 的 θ_L 在各种谐波源数量下最大, 最大偏差度为 0.435; 方案 5 的次之, 最

大偏差度为 0.338; 方案 3 最大偏差度为 0.255。方案 3、4、5 均不满足 θ_L 阈值约束。

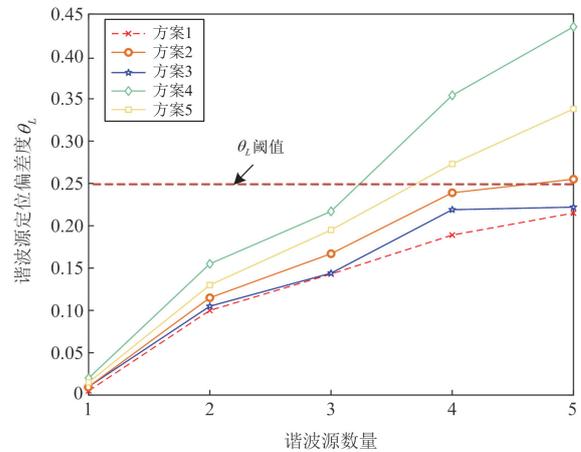


图 8 不同配置方案下的谐波源定位偏差度

Fig. 8 Deviation of harmonic source localization under different placement options

方案 1 与 2 均具有较好的溯源准确性, 但方案 2 配置监测装置数量多, 性价比比较差, 这是由于其配置方法使监测装置过于集中于节点 3 至节点 8 所在区域, 对于节点的覆盖性不足, 限制了监测装置获取谐波信息的丰富性; 在同等配置数量下, 如方案 4 与方案 5, 方案 4 由于去除了方案 3 中非集中配置的监测装置, 溯源准确性最差; 方案 5 去除方案 3 中集中配置的监测装置, 溯源准确性相对方案 4 较好, 但由于减少了监测装置, 相对方案 3 较差。因此, 本文配置方法可靠性较高, 本文所提监测装置配置方法能够得到技术与经济性最优的配置方案。

6 结论

本文提出了一种配电网谐波源信息未知条件下的监测装置优化配置方法。首先, 提出多场景谐波电流样本生成方法, 构建节点谐波电流关联模型, 生成大量谐波电流样本, 解决了样本丰富性不足的问题; 其次, 提出敏感度计算方法, 量化各谐波源节点对监测节点的影响, 刻画多谐波源背景下节点间的相关性; 其次, 提出基于敏感度的监测装置配置方法, 设定敏感度集中性与分散性约束, 解决指标值较优的节点过于集中时导致的冗余配置问题; 最后, 通过 IEEE33 节点模型进行算例分析, 验证了本文所提方法的适用性, 得到以下结论。

1) 通过所提多场景谐波样本生成方法与构建的节点谐波电流关联模型, 能够快速、大量地生成谐波电流样本, 生成的谐波样本准确性高, 在增强谐波样本丰富性方面, 具有一定的实用性。

2) 所提的敏感度计算方法, 能够在多谐波源相互作用的影响下, 量化各谐波源节点对监测节点的影响, 计算所得敏感度能够较准确地表征监测节点与其他节点谐波源之间的影响关系。

3) 所提的基于敏感度的监测装置配置方法, 通过设定敏感度集中性与分散性约束, 能够解决指标值较优的节点过于集中时导致的冗余配置问题, 具有较高的工程实用性。

参考文献

- [1] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [2] 张逸, 林楠, 张良羽, 等. 基于多源数据的馈线谐波频谱估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 63-73.
ZHANG Yi, LIN Nan, ZHANG Liangyu, et al. Harmonic spectrum estimation method for feeders based on multi-source data[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 63-73.
- [3] 肖先勇, 胡誉蓉, 王杨, 等. 基于非同步电能质量监测系统的谐波状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4121-4132.
XIAO Xianyong, HU Yurong, WANG Yang, et al. Harmonic state estimation based on asynchronous power quality monitoring system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4121-4132.
- [4] 李石强, 王鹤, 于华楠. 基于稀疏字典原子共享的电力系统谐波动态监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9559-9571.
LI Shiqiang, WANG He, YU Huanan. Dynamic monitoring method for harmonic in power system based on sparse dictionary atoms sharing[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9559-9571.
- [5] 张旭, 徐永海, 秦本双, 等. 基于正交匹配追踪算法的谐波源定位方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(4): 44-51.
ZHANG Xu, XU Yonghai, QIN Benshuang, et al. Harmonic source localization method based on orthogonal matching pursuit algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(4): 44-51.
- [6] 程宏波, 万紫彤, 李宗伟, 等. 套索回归在配电网谐波源定位的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(3): 59-65.
CHENG Hongbo, WAN Zitong, LI Zongwei, et al. Application of LASSO regression to harmonic source location in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2025, 37(3): 59-65.
- [7] CARTA D, MUSCASCAS C, PEGORARO P A, et al. Identification and estimation of harmonic sources based on compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 95-104.
- [8] 马永硕, 齐林海, 肖湘宁, 等. 基于改进生成对抗网络的谐波状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 139-145.
MA Yongshuo, QI Linhai, XIAO Xiangning, et al. Estimation method of harmonic state based on improved generative adversarial network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 139-145.
- [9] XU F, WANG C, GUO K, et al. Harmonic sources' location and emission estimation in underdetermined measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70.
- [10] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [11] DING J, ZHANG Q, HU S, et al. Clusters partition and zonal voltage regulation for distribution networks with high penetration of PVs[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(22): 6041-6051.
- [12] 林涌艺, 邵振国, 张嫣, 等. 基于多测点正序电压相关性与典型模式匹配寻优的电压暂降源定位[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 35-46.
LIN Yongyi, SHAO Zhenguo, ZHANG Yan, et al. Voltage sag source location based on the correlation of multipoint positive sequence voltage and the typical pattern matching optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 35-46.
- [13] WANG Y, MA H, XIAO X, et al. Harmonic state estimation for distribution networks based on multi-measurement data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2311-2325.
- [14] 张逸, 王攸然, 刘航, 等. 基于监测数据相关性分析的用户谐波责任划分方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 189-197.
ZHANG Yi, WANG Youran, LIU Hang, et al. Determination method of user harmonic responsibility based on correlation analysis of monitoring data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 189-197.
- [15] 邵振国, 林潇, 张嫣, 等. 基于特征集重构与多标签分

- 类模型的谐波源定位方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 147-154.
- SHAO Zhenguo, LIN Xiao, ZHANG Yan, et al. Harmonic source location method based on feature set reconstruction and multi-label classification model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 147-154.
- [16] 孙媛媛, 许庆燊, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 154-169.
- SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [17] 林丽娟, 贾清泉, 田书娅, 等. 基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 109-117.
- LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuaya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 109-117.
- [18] SAXENA D, BHAUMIK S, SINGH S N. Identification of multiple harmonic sources in power system using optimally placed voltage measurement devices[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 61(5): 2483-2492.
- [19] 王岭, 陈红坤, 王志成, 等. 一种基于实测数据的谐波源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 33-39.
- WANG Ling, CHEN Hongkun, WANG Zhicheng, et al. A harmonic sources localization method based on measured data[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 33-39.
- [20] 罗淞泓, 舒勤, 刘勇, 等. 宽频域谐波谐振监测装置优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 177-186.
- LUO Songhong, SHU Qin, LIU Yong, et al. Optimized placement of wide-band frequency harmonic resonance monitoring device[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 177-186.
- [21] 蒋海玮, 徐永海, 何志轩, 等. 考虑系统参数不确定性的谐波谐振监测点优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 141-151.
- JIANG Haiwei, XU Yonghai, HE Zhixuan, et al. Optimal placement method for harmonic resonance monitoring points considering uncertainties of system parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 141-151.
- [22] 段玉先, 刘昌云. 基于 Sobol 序列和纵横交叉策略的麻雀搜索算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(1): 36-43.
- DUAN Yuxian, LIU Changyun. Sparrow search algorithm based on Sobol sequence and crisscross strategy[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(1): 36-43.
- [23] 徐佳宁, 倪裕隆, 朱春波. 基于改进支持向量回归的锂电池剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3693-3704.
- XU Jianing, NI Yulong, ZHU Chunbo. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on improved support vector regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3693-3704.
- [24] 高敏, 朱明星, 张华赢, 等. 基于无相位谐波监测数据的谐振源辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 166-175.
- GAO Min, ZHU Mingxing, ZHANG Huaying, et al. Resonance source identification method based on phase-free harmonic monitoring data[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 166-175.
- [25] 李胜文, 张世锋, 张敏, 等. 电压暂降与谐波谐振监测点统一优化配置方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 145-153.
- LI Shengwen, ZHANG Shifeng, ZHANG Min, et al. Unified optimal configuration method of voltage sag and harmonic resonance monitoring points[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 145-153.
- [26] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 77-87.
- GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 77-87.

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-03-04

作者简介:

汪颖(1981—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量与优质供电; E-mail: tuantuan1125@scu.edu.cn

李元聪(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与优质供电; E-mail: 1512071121@qq.com

刘育权(1971—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为生产技术管理、标准化管理。E-mail: lyq710905@163.com

(编辑 石晋美)